

В. М. Бычков, А. С. Селиванов, А. Ю. Медведев,
В. А. Супов, Б. О. Большаков, Р. Р. Гринь, Ф. Ф. Мусин

ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРИВАЕМОСТИ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЭП742 МЕТОДОМ ЛИНЕЙНОЙ СВАРКИ ТРЕНИЕМ

Оценка свариваемости сплава ЭП742 при линейной сварке трением производилась по результатам металлографических исследований, измерения твердости, испытаний на статическое растяжение. По результатам оптической и растровой электронной микроскопии установлено, что сварное соединение отличается значительной структурной неоднородностью, выявлено значительное количество пор в сварном шве и зоне термомеханического влияния, при этом сварные соединения продемонстрировали достаточно высокую статическую прочность. *Линейная сварка трением; жаропрочные сплавы на основе никеля; ЭП742; микроструктура; пористость; свариваемость*

ВВЕДЕНИЕ

Для изготовления деталей ГТД применяются жаропрочные сплавы на никелевой основе. Сварка плавлением таких сплавов затрудняется появлением микротрещин, которое связывают с изменением размеров зерен и концентрацией вредных фаз на границах зерен. По сравнению со способами сварки плавлением сварка трением жаропрочных никелевых сплавов обладает рядом преимуществ. Опыт применения инерционной сварки трением за рубежом показывает, что сварной шов свободен от микротрещин и пор, легко формируется и отличается высокой прочностью при изменении параметров сварки в широком диапазоне. Оптимальные условия сварки для этого процесса можно подобрать на маленьких образцах и экстраполировать их на большие размеры.

Контактная информация: 8(347)273-08-66

Работа выполнена в рамках проекта «Создание технологий и промышленного производства узлов и лопаток ГТД с облегченными высокопрочными конструкциями для авиационных двигателей новых поколений» (шифр 2010-218-01-133) в рамках реализации Постановления № 218 Правительства РФ от 9.04.2010 г. «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства» совместно ОАО «УМПО» и ФГБОУ ВПО УГАТУ. Экспериментальные результаты получены с использованием оборудования НОЦ «Наноструктурные материалы и высокие технологии» ФГБОУ ВПО УГАТУ.

В доступной литературе было найдено несколько работ, посвященных сварке жаропрочных никелевых сплавов методом инерционной сварки трением [1–4].

Наиболее масштабное исследование свойств сварных соединений никелевых сплавов было выполнено авторами работы [1]. Показано, что при инерционной сварке состаренного сплава Waspaloy получается шов с высокой твердостью, имеющей относительный максимум в центре, вследствие наибольшего измельчения зерна в этой зоне. При более высоких энергиях и меньших усилиях получается более широкий шов, а твердость падает до значений, характерных для состояния после термообработки на твердый раствор. Кроме того, при правильном выборе параметров процесса шов, полученный при сварке состаренного сплава, обладает более высокими значениями механических характеристик по сравнению со стандартным состоянием.

Сварка материала после обработки на твердый раствор приводит к получению равнопрочного с матрицей стыка.

Долговечность более чувствительна к условиям сварки по сравнению с другими механическими свойствами. Но даже после сварки состаренного материала с малой энергией и высокой осевой нагрузкой ползучесть соединения не снижается. Удлинение и время второй стадии ползучести зависят от параметров сварки. Выбирая постоянной энергию и уменьшая момент инерции, можно повисить время до разрушения при ползучести и уменьшить удлинение перед установившейся стадией. Наилучшие свойства обнаруживают материалы, сваренные при высо-

кой осевой нагрузке, низкой энергии и низком моменте инерции.

В публикациях имеются данные о динамических испытаниях сварных соединений. Динамическим испытаниям подвергали 126 образцов сплава IN718. Параметры процесса изменяли в более широком, чем на практике диапазоне: осадку – от 1,8 до 9 мм, момент инерции – на 433 %, энергию – на 260 %, осевое усилие – на 200 %, скорость вращения – на 200 %. Было обнаружено, что изменение параметров в этих пределах практически не влияет на динамические характеристики сварного соединения. Положение места разрушения меняется. Не выявлено и влияние термообработки перед сваркой на усталостные свойства соединений. Полоса дисперсии значений свойств сварных соединений и основного металла перекрываются. Эти данные показывают, что статистически значимого влияния параметров режима инерционной сварки трением на усталостную прочность этого сплава не выявлено.

Авторы работы [2] выполнили инерционную сварку трением никеля НП2 при частоте вращения 750 об/мин, давлении в стадии нагрева 60 МПа и длительности нагрева 2, 4 и 6 с без проковки. Металлографические исследования показали, что в зоне сварного соединения нет дефектов типа пор, раковин, трещин, расслоений и др.

Рекомендации по режимам инерционной сварки трением, полученные расчетным путем [3] показывают положительное влияние снижения окружной скорости и увеличения давления сварки на минимизацию ширины зоны фазовых превращений.

Механические свойства сварных соединений образцов из сплавов ВКНА-25 и ЭП975, полученные авторами работы [4], приведены в табл. 1. Сварка проводилась при различных вариантах термической обработки и сварки сплава ЭП975. Результаты исследования микрошлифов сварных соединений показали, что дефекты в шве и околошовной зоне не обнаружены.

Таблица 1

Механические свойства сварных соединений[4]

Вариант сварки	σ_B^{20} , МПа	σ_B^{975} , МПа	КСУ ²⁰ , Дж/см ²
отжиг + сварка + закалка + старение	520–940	340–410	21–39
отжиг + закалка + сварка + старение	720–770	350–450	4–6
отжиг + закалка + старение + сварка	720–910	360–380	2–7

Из анализа публикаций видно, что процесс инерционной сварки трением жаростойких никелевых сплавов исследуется достаточно давно, в том числе и для применения при сварке блисков газовых турбин. Результаты исследований говорят о том, что можно достичь свойств сварных соединений близких к свойствам основного материала.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения исследования свариваемости сплава ЭП742 методом линейной сварки трением (ЛСТ) были изготовлены заготовки в виде параллелепипеда с размерами 35 × 26 × 13 мм (рис. 1, а).

Для исследования свариваемости были приняты следующие режимы сварки:

- частота осцилляции $f = 50$ Гц;
- амплитуда осцилляции $A = 2$ мм;
- усилие осадки $P = 150$ кН;
- усилие проковки $P_{пр} = 220$ кН;
- осадка – 2 мм.

В ходе сварки были получены заготовки размером 26 × 13 × 68 мм. Внешний вид сваренной заготовки после ЛСТ приведен на рис. 1, б.

Давление при сварке было принято равным 450 МПа, т. е. для заготовки с рабочей площадью 26 × 13 = 338 мм² усилие составило 152,1 кН.

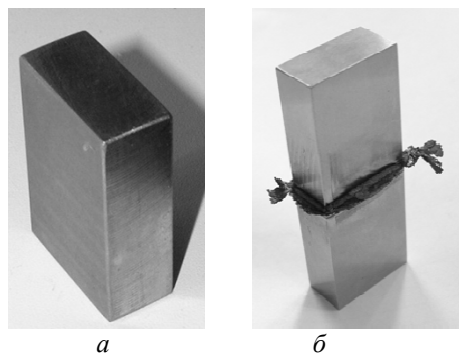


Рис. 1. Образцы сплава ЭП742: а – до сварки; б – после ЛСТ

Циклограмма процесса сварки представлена на рис. 2. Сравнение циклограмм, соответствующих сварке никелевых и титановых сплавов [5], показывает, значительно большую продолжительность сварки и меньшую скорость осадки в случае сварки никелевого сплава. Приложение ковочного усилия вызывает значительную порядка пластическую деформацию до 0,3 мм, что свидетельствует о большей глубине зоны прогретой при сварке.

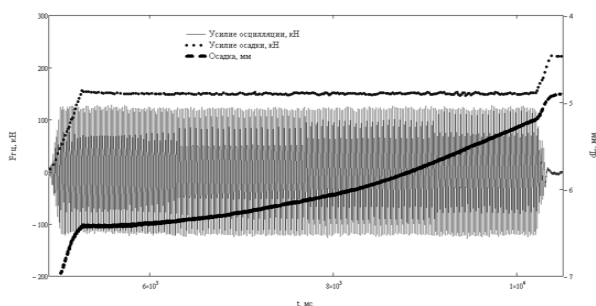


Рис. 2. Циклограмма процесса сварки

Микроструктуру сплава ЭП742 выявляли реактивом Марбле. Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе OLYMPUS GX-51 и растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOL JSM-6390. Элементный химический анализ проводили при помощи приставки INCA. Измерения твердости осуществляли методом Виккерсана на твердомере Du-ramin-2 Struers (нагрузка составляла 1 кг, время приложения 10 с). Испытания на растяжение выполняли при комнатной температуре со скоростью деформирования 2 мм/мин на универсальной машине Инстрон 5982 по ГОСТ1497. Размер рабочей части образцов диаметром 5 составлял 50 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки качества сварки жаропрочного никелевого сплава ЭП742 были проведены испытания на статическое растяжение трех цилиндрических образцов (рис. 3). Результаты измерения предела прочности σ_b и относительного удлинения до разрушения δ представлены в табл. 2.

Как видно из рис. 3, разрушение образцов произошло по области в районе сварного шва. На двух образцах, показавших наибольшие значения относительного удлинения, обнаружено образование шейки в районе сварного шва и зоне термического влияния (образец номер 1 и 3). Образец номер 2 разрушился без образования шейки и показал наилучшие свойства.

Сравнение полученных результатов с ТУ14-1-3998-85 (Поковки (шайбы) из жаропрочного сплава марки ХН62БМКТЮ-ИД (ЭП742-ИД)) позволяет сделать вывод, что большая часть (2 из 3-х) образцов соответствует техническим условиям (табл. 2). Среднее арифметическое значение относительного удлинения составляет 15,3 % при минимальных 13 % по техническим условиям на основной материал.

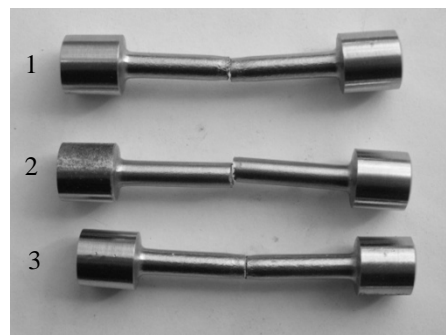


Рис. 3. Образцы после испытаний на растяжение

Таблица 2

Результаты испытаний на статическое растяжение

№ образца	σ_b , МПа	δ , %
1	124,5	17,2
2	117,7	12,8
3	137,2	16,0
по ТУ14-1-3998-85	≥ 123	≥ 13

Макроструктура сварного соединения жаропрочного никелевого сплава ЭП742 приведена на рис. 4. Из рисунка видно, что макродефектов виде непроваров и несплошностей в зоне сварного соединения не наблюдается. Вместе с тем можно отметить наличие цепочек грубых выделений вторых фаз в околшовной зоне и зоне сварки. Можно выделить три зоны, формирование которых характерно для ЛСТ [6]: зона сварного шва или рекристаллизованная зона (РЗ), зона термомеханического влияния (ЗТМВ) и основной материал (ОМ).

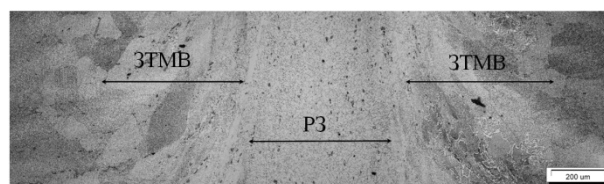


Рис. 4. Микроструктура соединения сплава ЭП742

Эти зоны характеризуются разным размером зерен, наличием либо отсутствием металлографической текстуры. Размер зерен в зоне основного материала составляет 247,0 мкм. В ЗТМВ происходит трансформация исходной крупнозернистой глобулярной структуры. Зерна приобретают вытянутый в направлении течения

материала характер. Коэффициент вытянутости зерен увеличивается с приближением к РЗ.

Рекристаллизация, прошедшая в зоне сварного соединения при ЛСТ, по-видимому, имеет метадинамический характер и протекает уже после окончания деформации в процессе охлаждения. В результате рекристаллизации в сварном шве сформировались равноосные зерна со средним диаметром 8,2 мкм.

Ширина РЗ и ЗТМВ составляет 0,6 и 0,8 мм соответственно, и практически не меняется по длине сварного шва.

Проведенное исследование полированной поверхности образца, выявило значительное количество мелких пор в ЗТМВ и РЗ (рис. 5, а). Детальный анализ зон сварного соединения в РЭМ подтвердило наличие множества пор (рис. 5, б), расположенных по границам зерен и в тройных стыках. Пористость, по-видимому, явилась причиной уменьшения прочности сплава в РЗ, образования шейки и разрушения образцов при статическом растяжении у сварного шва.

Исследование фазового состава сварного соединения показало, что в материале наблюдаются как крупные частицы вторых фаз с $d_{cp} \approx 10$ мкм, так и мелкие частицы γ' -фазы с $d_{cp} \approx 0,6$ мкм. Микрорентгеноспектральный анализ крупных частиц показал, что это карбиды титана и ниобия. Пример таких частиц приведен на рис. 6, а.

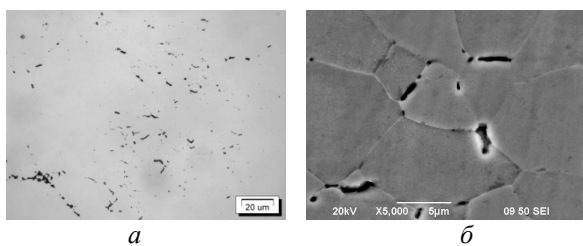


Рис. 5. Поры в микроструктуре соединения сплава ЭП742: а – оптическая микроскопия, б – РЭМ

Пластическая деформация при ЛСТ приводит к перераспределению карбидов в РЗ. Частицы вытягиваются в цепочки в направлении течения материала. Такие цепочки грубых вторых фаз могут выступать в роли концентраторов напряжения и приводить к трещинообразованию в сварном соединении.

Исследование твердости зон сварного соединения (рис. 7) показало, что в РЗ наблюдается некоторое (до 7 %) ее снижение, что может быть связано с частичным растворением γ' -фазы

под воздействием нагрева при ЛСТ и быстрым охлаждением с температуры сварки. Такое распределение твердости не типично для сварных соединений, полученных ЛСТ на других классах материалов [6–7]. В случае сплава ЭП742 влияние уменьшения количества γ' -фазы оказывает большее по величине влияние на прочность сплава в зоне сварного соединения, чем деформационное упрочнение и уменьшение размера зерен при рекристаллизации.

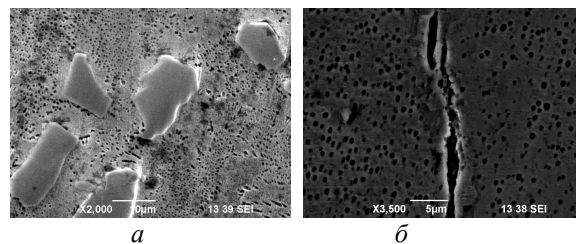


Рис. 6. Вторые фазы в сплаве ЭП742: а – грубые частицы карбидов; б – мелкие частицы γ' -фазы и трещина

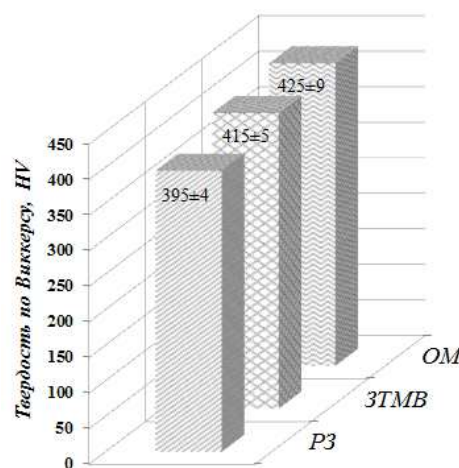


Рис. 7. Распределение твердость в зоне сварного соединения сплава ЭП742

ВЫВОДЫ

1. Линейная сварка трением сплава ЭП742 на опробованном сочетании параметров режима обеспечивает получение твердофазного соединения без макродефектов.
2. Образование мелких пор по границам зерен и цепочек грубых выделений карбидов способствуют возникновению и развитию трещин при ЛСТ.
3. При испытаниях на статическое растяжение разрушение соединения происходит по сварному шву. Механические свойства сварного соединения соответствуют уровню требований

к основному материалу марки ЭП742 по ТУ14-1-3998-85.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жаропрочные сплавы для газовых турбин / под ред. Р. Е. Шалина. М. : Металлургия, 1981. 480 с.
2. **Кучук-Яценко С. И.** Расчетная оценка термомодеформационных условий формирования соединений жаропрочного сплава ЭИ698ВД при сварке трением // Автоматическая сварка. 2009. № 7.
3. Особенности формирования структуры (текстуры) металла при сварке трением никеля / Э. С. Каракозов [и др.] // Сварочное производство. 1990. № 4.
4. Особенности технологии сварки трением соединений из сплавов ВКНА-25 и ЭП975/ В. И. Лукин [и др.] // Сварочное производство. 2010. № 5.
5. **Медведев А. Ю., Никифоров Р. В., Супов А. В.** Определение составляющих энергетического баланса при линейной сварке трением // Известия Самарск. науч. центра Российск. акад. наук. 2012. Т. 14, № 1(2). С. 392–395.
6. Влияние величины осадки на формирование сварного соединения при линейной сварке трением / М. В. Караваева [и др.] // Письма о материалах. 2012. Т. 2. С. 40–44.
7. Структура, свойства и горячая деформация сварного соединения стали 08X18H10T, полученного линейной сваркой трением (ЛСТ) / А. А. Закирова [и др.] // Перспективные материалы. 2011. № 12. С. 155–160.

ОБ АВТОРАХ

Бычков Владимир Михайлович, доц. каф. оборудования и технологии сварочн. производства. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1976). Канд. техн. наук по машинам и технологии сварочн. производства (Уральск. политехн. ин-т, 1980). Иссл. в обл. физики и техники дуговых и плазменных процессов в сварочном производстве.

Селиванов Алексей Сергеевич, ст. преп. той же каф. Дипл. магистр техники и технологий (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. линейной сварки трением.

Медведев Александр Юрьевич, доц. той же каф. Дипл. магистр техники и технологий (УГАТУ, 1999). Канд. техн. наук по машинам и технологии сварочн. производства (Тольяттинск. гос. ун-т, 2003). Иссл. в обл. моделирования нагрева при сварке, аргонодуговой сварки, сварки трением.

Супов Андрей Владимирович, нач. технологическ. бюро ОАО «УМПО». Дипл. инженер по оборудованию и технологии сварочн. производства (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. линейной сварки трением.

Большаков Борис Олегович, асп. каф. материаловедения и физики металлов, инженер НОЦ «Наноструктурные материалы и высокие технологии». Дипл. магистр техники и технологии по материаловедению и технологии новых материалов (УГАТУ, 2012). Иссл. в обл. прочности и разрушения материалов.

Гринь Регина Равиловна, инженер той же каф. Дипл. магистр техники и технологии (УрФУ, 2012). Иссл. в обл. линейной сварки трением.

Мусин Фаниль Фанусович, доц. той же каф., техн. директор НОЦ «Наноструктурные материалы и высокие технологии». Канд. физ.-мат. наук (ИПСМ РАН, 1994). Иссл. в обл. материаловедения алюминиевых, титановых сплавов и сталей.